ChinaXiv合作期刊

心理学报　2021, Vol. 53, No. 5, 505−514
Acta Psychologica Sinica
© 2021 中国心理学会
https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2021.00505

chinaXiv:202303.08710v1

体感游戏促进儿童的执行功能：运动强度和认知参与的作用*

盖笑松　许　洁　闫　艳　王　元　谢笑春
(东北师范大学心理学院，长春　130024)

摘　要　为了考察体感游戏促进儿童执行功能的作用机制，采用 2(运动强度：高/低) ×2(认知参与：高/低) ×3(测量时间：前测、一次性训练后测、长期训练后测)的三因素混合实验设计，对 122 名 4~6 岁儿童进行 6 周(每周 3 次)的体感游戏训练。结果发现：在一次性训练中，体感游戏中的运动强度而不是认知参与显著促进儿童执行功能，尤其是工作记忆；在长期干预中，体感游戏中的运动强度和认知参与都显著促进儿童执行功能，且认知参与的作用大于运动强度。这一结果不但验证了体感游戏对儿童执行功能的益处，并且阐明了体感游戏中的哪些特征能对儿童执行功能具有短期的和长期的效果。

关键词　体感游戏，认知参与，运动强度，执行功能
分类号　B844

1　问题提出

执行功能(Executive Function)是在完成复杂的认知任务时，对其他认知过程进行控制、调节的高级认知过程(Funahashi, 2001)，包括工作记忆、抑制控制和认知灵活性三个核心成分。工作记忆(Working Memory)是用于处理活动记忆中暂存信息的认知过程(Baddeley & Hitch, 1994)；抑制控制(Inhibitory Control)是指个体通过控制自己的注意、行为、想法或情绪来抵制强烈的内在反应倾向或外在诱惑的心理过程(Diamond, 2013)；认知灵活性(Cognitive Flexibility)建立在工作记忆和抑制控制的基础上，发展较晚(Davidson et al., 2006)，是指面对新情境时，能够做出符合新环境要求之反应，克服反应定势，保持思想和动作灵活性的心理过程。早期执行功能能够预测儿童身心健康(Baler & Volkow, 2007; Riggs et al., 2010)、学业成绩(Borella et al., 2017)，尤其是数学和阅读能力，以及成年后的家庭幸福(Davis et al., 2010)等。

儿童的执行功能具有可塑性(Diamond & Lee, 2011; Lin et al., 2018)。早期的儿童执行功能训练是以计算机化训练为主的，其中，基于计算机的Cogmed 工作记忆训练(Cogmed Working Memory Training)被认为是最成功的，该训练逐步增加难度，研究发现，基于计算机的 Cogmed 工作记忆训练能够明显改善正常儿童和工作记忆缺陷儿童的工作记忆水平(Roche & Johnson, 2014)；Thorell 等人(2009)对儿童进行 5 周的工作记忆或者抑制控制的自适应计算机化训练，结果发现儿童工作记忆促进效果最好，但对儿童抑制控制、认知灵活性、注意力的改善未起到促进作用。

随着新媒体技术的进步，同时也为了增强儿童执行功能训练的趣味性，研究者开始采用视频游戏改善执行功能(Anderson-Hanley et al., 2014)。Oei 和 Patterson 发现，割绳子智力游戏(cutting the rope)能够促进大学生的执行功能，尤其是抑制控制(Oei

收稿日期: 2020-04-27
* 国家社会科学基金重大项目(19ZDA357)。
盖笑松和许洁为共同第一作者
通信作者：谢笑春, E-mail: psyxiexc@163.com.

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08710v1

& Patterson, 2014)。在 90 名 4~6 岁儿童中通过视频游戏进行抑制控制训练的研究发现，5 天后儿童抑制控制有所改善(Liu et al., 2019)。俄罗斯方块等能引发儿童较高参与度的益智游戏，对儿童执行功能的促进作用更大(Martinovic et al., 2015)。但是，视频游戏训练需要儿童长时间静坐，且对于包含计划、解决问题等因素的游戏，年龄较小的儿童体验起来比较困难(Martinovic et al., 2015)，因此，利用视频游戏进行儿童执行功能的干预可行性较低。不论是计算机化训练还是视频游戏，均需要儿童久坐，但是久坐不利于儿童的身体健康(Weiss et al., 2011)。

考虑到儿童执行功能训练的趣味性和长期可行性，研究者们开始利用身体活动对儿童执行功能进行训练。研究发现协调运动(Budde et al., V2008)、足球(Alesi et al., 2016)、瑜伽(Razza et al., 2015)、武术训练(Lakes, 2013)等身体活动都能改善儿童执行功能。体感游戏(exergame)也是一种身体活动，它可以激发更活跃的全身游戏体验(Staiano et al., 2012)。研究者们发现体感游戏能够促进老年人、注意缺陷多动障碍(ADHD)、以及儿童、青少年的执行功能(Anderson-Hanley et al., 2014; Benzing et al., 2018)。体感游戏将认知活动和身体活动结合。有研究表明进行体感游戏会促进神经重塑效应，以致提高大脑某些认知功能(Lauenroth et al., 2016)。一方面，从体育锻炼的角度来看，体育锻炼能够促进分泌邻苯二酚胺等物质分泌并增加血流量，从而促进前额叶皮层活动(Verburgh et al., 2014)。由于儿童时期大脑的可塑性更强，这些经历可能会使认知功能得以永久性改善(Mehren et al., 2019)。另一方面，在游戏中，儿童需要完成一些视觉和空间记忆任务、也需要根据游戏环境和要求控制身体和运动速度(Dye & Bavelier, 2010)，这些认知要求有利于使执行功能得到更多运用，通过游戏训练能够促进儿童的执行功能(Achtman et al., 2008)。

然而，并不是所有的身体活动都能提高执行功能。一方面，身体活动的运动强度可能是有效改善执行功能的原因之一。运动强度代表着适宜运动的负荷，通常通过心率或者摄氧量来表示。一项元分析结果显示，中等运动程度的身体活动对执行功能改善的效果量大于剧烈程度的身体运动(Mcmorris & Hale, 2012)，也就说，并非运动强度越大就促进效果越好。陈爱国等人(2014)的研究发现，相同时间的不同强度的篮球运动对小学生的执行功能产生有益的影响，但收益不同，其中中等强度的篮球运动干预方案最能改善儿童执行功能。唤醒理论认为(Best, 2012)，运动增加了儿童的脑部新陈代谢，大脑皮层血流量增加，从而优化了认知资源的分配，促进了认知加工效率的提升(Audiffren et al., 2008)。

另一方面，身体活动中的认知参与可能是改善儿童执行功能的另一重要原因。认知参与是指当掌握困难的技能时所需要的注意资源分配和认知努力的水平(Tomporowski et al., 2015)，这被认为是影响执行功能的关键因素，一些身体活动促进儿童执行功能的研究没有考虑到身体活动本身所需要的认知参与(Best, 2010; Pesce, 2012)，比如 Alesi 等人(2016)通过对 8 岁儿童进行足球训练改善其敏捷性、视觉空间工作记忆、注意力、计划和抑制控制等方面，因为足球运动需要前瞻控制、感知机能、协调控制以及计划，所以足球运动对执行功能的促进效果可能混淆了运动强度与认知参与两因素的作用。为了分离出两因素的不同作用, Schmidt 等人(2016)将 92 名 11~12 岁儿童分成 4 组(高/低 运动强度 × 高/低 认知参与)进行一次性 10 分钟的身体活动训练。结果表明，高认知参与的身体活动能改善儿童注意力。这项研究表明身体活动中的认知参与是促进儿童注意力的重要因素。之所以认知参与能够促进儿童执行功能，首先是因为有挑战的环境能够提高认知能力，并且改变大脑相应结构(Adcock et al., 2020)。其次，根据认知刺激假说，活动中的认知参与激活了与控制高阶认知过程相关的大脑区域(Benzing & Schmidt, 2019)。

在体感游戏可以更直接操纵运动强度和认知参与的作用。Benzing 等人(2016)从运动强度和认知参与的角度设计了 3 组不同的体感游戏(高运动强度+高认知参与、高运动强度+低认知参与、低运动强度+低认知参与)对 65 名 13~16 岁的青少年进行单次 15 分钟被试间实验干预(Benzing et al., 2016)。“高运动强度+高认知参与”组采用塑形健身的模仿类体感游戏，“高运动强度+低认知参与”组采用的是虚拟街道奔跑体感游戏，“低运动强度+低认知参与”组是让被试观看山地跑的纪录片。结果发现，“高运动强度+高认知参与”组在认知灵活性的任务上有所改善。但是，由于这项研究缺少“低运动强度+高认知参与”这一实验组，仅证实了认知参与的作用，不能确切说明运动强度的作用。

为了进一步探究运动强度和认知参与对儿童执行功能的影响，Best (2012)在体感游戏训练中操纵运动强度和认知参与两因素，将游戏分成 4 类

ChinaXiv合作期刊

(高/低 运动强度 × 高/低 认知参与), 并对 33 名 6~9 岁(平均年龄 8.1 岁)的儿童进行四类游戏的被试内实验, 干预时长为 20 分钟。其中, “高运动强度+高认知参与”组采用了一款丛林探险的体感游戏, 要求儿童用身体控制游戏人物, 躲避障碍物(坑、滚木等), 随着游戏的进行, 任务变得更加困难。“高运动强度+低认知参与”组采用马拉松赛跑的体感游戏, 要求儿童尽可能地快跑。“低运动强度+高认知参与”组采用视频游戏——超级玛丽, 要动脑思考如何躲避困难和获得奖励, 并作出相应的简单动作。“低运动强度+低认知参与”组让儿童看健康类视频。研究结果发现, 仅高运动强度的体感游戏能够促进儿童的抑制控制。这项研究说明了体感游戏中的运动强度因素对儿童执行功能起主要作用。

然而前述研究均是对儿童进行一次性训练, 因此无法排除这样一种可能性: 一次性训练增加了血流量和唤醒度, 所以运动强度促进执行功能的作用明显, 而长期干预后认知参与促进执行功能的效果才会显示出来。Schmidt 等人(2015)将 181 名 10~12 岁的小学生分成 3 组, 进行为期 6 周(每周两次、每次 45 分钟)的干预(Schmidt et al., 2015)。其中, “高运动强度+高认知参与”组是让儿童玩篮球和足球游戏, 游戏规则由教师指定, 玩一阵后老师吹哨子, 之前的规则就会改变, 儿童需要适应新的规则。“高运动强度+低认知参与”组是让儿童进行循环马拉松训练。“低运动强度+低认知参与”组是让孩子静坐听故事。经过六周干预后, 只有“高运动强度+高认知参与”组的认知灵活性得到改善。虽然这项研究说明“高运动强度+高认知参与”组对儿童的认知灵活性的作用, 但是由于该研究缺少“低运动强度+高认知参与”实验进行对照, 无法说明运动强度和认知参与对儿童执行功能的长期促进效果。因此, 本研究拟增加这一对照组。

为了考察体感游戏中的运动强度因素和认知参与因素对儿童执行功能的作用, 本研究在 Best (2012)研究的基础上进行了改进, 分别在训练前、第一次训练后、最后一次训练后进行执行功能核心成分的测验, 将 122 名 5~6 岁儿童分成 4 组(高/低 运动强度×高/低 认知参与), 分别进行为期 6 周(每周 3 次, 每次 20 分钟)的体感游戏训练, 进行 2(高/低 运动强度)×2(高/低 认知参与)×3(测验次数: 前测、第一次训练后测、长期训练后测)的三因素混合实验设计, 旨在澄清短期和长期体感游戏训练中运动强度因素和认知参与因素的不同作用。

2 研究方法

2.1 被试

被试选取长春市五所幼儿园随机选择 4~6 岁儿童 130 名。其中, 在训练期间“高运动强度+低认知参与”组、“低运动强度+低认知参与”组分别有 5 名、3 名儿童中途转园, 无法完成后续训练和测验。另外, 后“低运动强度+高认知参与”和“低运动强度+低认知参与”分别有 2 名儿童只参与干预过程, 未参与执行功能后测, 最终纳入分析的有效被试共有 122 名, 平均年龄 $M_{月}$ = 68.29 (SD = 5.98), “高运动强度+高认知参与”、“高运动强度+低认知参与”、“低运动强度+高认知参与”、“低运动强度+低认知参与”各组人数分别是 32 人、28 人、30 人、30 人。所有儿童均为右利手, 视力和听力均发展正常, 实验结束后, 每个儿童会得到奖励和反馈。此外, 本研究在实施前已获得了幼儿园、家长和儿童的知情同意。

2.2 实验设计

采用 2(运动强度: 高/低) ×2(认知参与: 高/低) × 3(测量时间: 前测: 第一次训练后测、长期训练后测)。其中, 运动强度和认知参与是被试间变量, 每组训练 6 周, 每周训练三次, 20 分钟/次。中间休息 3 分钟。执行功能的 3 个核心成分(工作记忆、抑制控制、认知灵活性)为因变量。

2.3 实验实施

训练开始前, 儿童进行执行功能前测, 并佩戴心率绑带。第 1 次 20 分钟训练后, 记录儿童平均心率, 并对儿童进行认知参与的测量。之后训练至第 9 次、第 18 次时, 再为儿童进行认知参与测量, 其余训练只进行心率测量, 不进行认知参与测量, 以防重复次数太多, 儿童厌烦。执行功能后测分别在第 1 次训练后、第 18 次训练后测量。具体流程示意图见图 1。

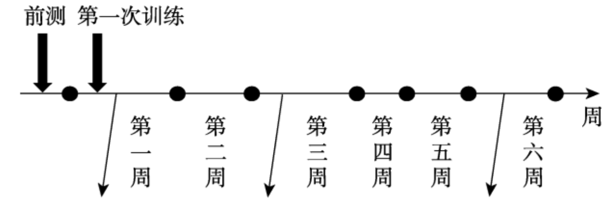


图 1　实验实施流程图

2.3.1 自变量操作

(1)游戏的选取过程

chinaXiv:202303.08710v1

ChinaXiv合作期刊

基于 Best (2012)以及以往的游戏经验，研究者挑选 8 款适合儿童进行游戏。再由 30 名学前教育专业和发展心理学专业研究生体验 1.5 小时后，进行问卷作答，请研究生根据其专业知识和经验，估计儿童在游戏中的体验并对 8 种游戏的特征(兴奋度、专注度、无聊程度)分别进行排序(得分范围 1~8)并进行方差分析和事后检验，最终所选 4 款游戏，各游戏的认知参与分数分别是 $M_{体感大冒险}(SD)$ = 7.23 (0.91)、$M_{体感马拉松}(SD)$ = 3.44 (1.51)、$M_{超级玛丽}(SD)$ = 5.76 (1.13)、$M_{动画片《托马斯》}(SD)$ = 2.28 (1.16)，经过方差分析，F = 43.55, p < 0.01，各组差异显著。一致性系数(ICC)是 0.961，这表明 30 名大学生对 4 款游戏的认知参与评价一致性较高，也说明可信性很高。运动强度分数详见表 1。

表 1　自变量操纵的有效性分析

组别	运动强度			认知参与		
	N	*M*	*SD*	*N*	*M*	*SD*
“高运动强度+高认知参与”	161.00	139.40	16.05	90.00	5.43	0.50
“高运动强度+低认知参与”	127.00	143.06	15.48	84.00	1.17	0.93
“低运动强度+高认知参与”	175.00	101.14	10.55	96.00	5.26	0.87
“低运动强度+低认知参与”	163.00	98.13	9.33	96.00	0.96	0.74
F		528.34**			932.68**	

注：** p < 0.01, * p < 0.05

“高运动强度+高认知参与”组：采用体感游戏——大冒险游戏，该游戏由 112 cm × 62 cm 的电视机和体感游戏机 Xbox360 共同呈现，儿童在离电视机 1.5 m 左右活动。游戏内容是儿童在水中滑板，通过躲避各种障碍物，获得更多金币，达到终点。其中，高运动强度体现在儿童需要不停地跑、跳来进行滑板的加速和躲避障碍。高认知参与体现在障碍物任意出现，且有多种障碍物，例如浮木、石头以及会移动地小旗；金币藏在各个角落，也需要儿童进行辨别思考和决策。

“高运动强度+低认知参与”组：采用体感游戏——马拉松，该游戏由 112 cm × 62 cm 的电视机和体感游戏机 Xbox360 共同呈现，儿童在离电视机 1.5 m 左右活动。在马拉松体感游戏中，儿童只进行跑步运动。高运动强度体现在儿童需要不断进行跑步，低认知参与则体现在无需进行其他认知活动，不需要分配其他注意资源。

“低运动强度+高认知参与”组：采用电子游戏——超级玛丽，该游戏由该游戏由 112 cm × 62 cm 的电视机和体感游戏机 Xbox360 共同呈现，儿童在离电视机 1.5 m 左右静坐。在这款游戏中，儿童需要静坐在屏幕前，通过手柄进行游戏，扮演游戏中的玛丽完成躲避障碍物和目标任务。由于儿童静坐完成活动，因此该活动为低运动强度。高认知参与体现在儿童需要躲避各种障碍物(障碍物会发生变化，比如砖、会移动的乌龟，并且还需要获得金币同时获得道具)，注意场景的变化，需要高度集中注意力。

“低运动强度+低认知参与”组：观看视频——托马斯。儿童静坐在 112 cm × 62 cm 的电视机前观看《托马斯和他的朋友们》动画片，儿童在离电视机 1.5 m 左右做好。儿童只需要静坐在屏幕前观看视频，该活动不需要儿童运动和思考，因此，该活动为低运动强度和低认知参与。

(2)自变量操纵有效性测量

运动强度：儿童佩戴 Polar H10 心率绑带，记录活动期间的平均心率。心率绑带佩戴在胸上，以记录数据。第 1 次训练共收集 122 个平均心率。第 2 次至最后 18 训练共收集 504 个平均心率。

认知参与：儿童认知参与的测量采用改编的 Best (2012)问卷形式，共 8 道选择题，每道题只有两个选项。例如“你更喜欢参加我今天跟你做的这个活动还是在操场上玩你喜欢的游戏？”选择“今天做的活动”得 1 分，否则 0 分。在第 1 次训练、第 9 次训练、第 18 次训练结束后作答。

认知参与分数是分别在第 1 次训练、第 9 次训练、第 18 次训练后通过认知参与测量。通过方差分析发现，四组平均心率、认知参与差异显著(p < 0.05)，经过事后检验发现，“高运动强度”两组运动强度高于“低运动强度”两组，且“高运动强度”两组之间运动强度无差异(p > 0.05)，“低运动强度”两组之间运动强度无差异(p > 0.05) (见表 1)。同此，“高认知参与”两组的认知参与高于“低认知参与”两组，且“高认知参与”两组之间认知参与无差异(p > 0.05)，“低认知参与”两组之间认知参与无差异(p > 0.05) (见表 1)。

因此，本研究的自变量操纵是有效的。

2.3.2　因变量执行功能测验

所有测验均在幼儿园教室进行，儿童在训练前、第一次训练后、最后一次训练后进行执行功能测验。工作记忆测量时间大约 5 分钟，抑制控制测

chinaXiv:202303.08710v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08710v1

量时间大约 5 分钟，认知灵活性测量时间大约 10 分钟，所有测验依次进行。

工作记忆——倒背数字(Backward Digit)，本研究采用 WISC-IV 中的倒背数字测验(Lecce et al., 2017)。让儿童将听到的数字串倒着回忆，数字串采用录音的形式播放。数字串的长度为 2~9，相同的数字串长度出现两次，每两次增加一个数字。当儿童两次回忆同一长度的数字串都出错时，测验停止。计分为正确回忆一个数字串的一分。得分的范围为 0~16 分。图 2 是工作记忆测验听力流程图，以数字串长度为 2 举例。

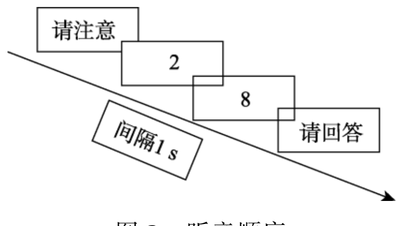


图 2　听音顺序

抑制控制——侧抑制任务(ANT-C) (Best, 2012)是一项改编的侧抑制任务 Flanker 测验。利用 Eprime 2.0 呈现实验材料，屏幕中央会出现一排 5 条小鱼，请儿童判断最中间小鱼的方向，向左或者向右。计分为反应时和准确率。练习部分共 12 个 trail，有反馈，随机出现左右小鱼；正式实验部分由 2 个 block 组成，每个 block 有 24 个 trail，无反馈，随机出现左右小鱼。记录正确率和反应时。图 3 是抑制控制正式测验流程图。

注视时长600 ms

判断时长最长1700 ms

图 3　E-prime 抑制控制程序

认知灵活性——维度变化卡片分类任务(The Dimensional Change Card Sort, DCCS) (Zelazo, 2006)，是一项卡片分类任务。分为 3 步。第一步是对卡片进行颜色判断。一共 6 张卡片(3 张红色兔子，3 张蓝色小船)，将蓝色卡片放在左边筐子中，红色卡片放在右边筐子中。第二步是将兔子和小船分类。一共 6 张卡片(3 张红色兔子，3 张蓝色小船)，将小兔卡片放在左边筐子中，小船卡片放在右边筐子中。前两步中，儿童如果正确分类 5 次及以上，算通过。第三步是区分有无边界的卡片。一共 12 张卡片(3 张带黑边的红色兔子，3 张不带黑边的红色兔子，3 张带黑边的蓝色小船，3 张不带黑边的蓝色小船)。如果儿童拿到带黑边的卡片，要按照颜色分类，拿到不带黑边的卡片，要按照小兔和小船分类)。第三步中，儿童正确分类次数达到 9 次及以上，算通过。计算正确分类次数以及通过阶段数。

3　结果分析

3.1　儿童年龄、家庭社会经济地位、身体活动情况的背景调查

为了检验各组的同质性，对儿童的年龄、性别、家庭社会经济地位、身体质量指数、每周进行身体活动百分比、周一至周五进行视频游戏百分比和周末进行游戏的百分比进行方差分析。分析发现，4 个实验组年龄(F(3, 118) = 0.75, p > 0.05)、性别(χ^2 (3) = 1.01, p > 0.05)、家庭社会经济地位(SES) (F(3, 118) = 0.43, p > 0.05)、身体质量指数(F(3, 118) = 0.86, p > 0.05)上无显著差异。同时，各组由父母报告的儿童每周进行身体活动或者视频游戏频率差异不显著(χ^2 (3) = 4.12, p > 0.05; χ^2 (3) = 3.26, p > 0.05)，且与前测执行功能各指标相关不显著(p > 0.05)，说明四组实验组有较好的同质性。

3.2　运动强度和认知参与对儿童执行功能的影响

在训练前，对各实验前测的执行功能各指标进行方差分析，结果发现：工作记忆、抑制控制准确率、抑制控制反应时、认知灵活性通过阶段数、认知灵活性正确分类次数的前测成绩差异不显著，F_1(3, 118) = 0.08, p > 0.05; F_2(3, 118) = 1.03, p > 0.05; F_3(3, 118) = 0.27, p > 0.05; F_4(3, 118) = 0.33, p > 0.05; F_5(3, 118) = 0.04, p > 0.05)，这说明，各组儿童在训练前执行功能的水平并无差异。

为了探究活动的运动强度和认知参与对儿童执行功能的影响，采用 2(运动强度：高/低) × 2(认知参与：高/低) ×3(测量时间 Time：前测、一次性训练后测、长期训练后测)的混合方差分析，将运动强度和认知参与作为被试间变量，将测量时间作为被试内变量，因变量为执行功能各指标。

3.2.1　运动强度和认知参与对儿童工作记忆的影响

为考察运动强度和认知参与对儿童工作记忆的影响，通 2×2×3 的混合方差分析发现：工作记忆的测量时间 Time 主效应显著，F(2, 236) = 29.01, p < 0.001, η_p^2 = 0.20。经过事后检验发现，长期训练的工作记忆(M = 3.63, SD = 0.13)显著好于第一次训练

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08710v1

后测(M = 2.95, SD = 0.13)，均显著好于前测(M = 2.56, SD = 0.15)。工作记忆的运动强度的主效应显著，$F(1, 118) = 4.96$, $p = 0.028$, $\eta_p^2 = 0.04$。认知参与主效应显著，$F(1, 118) = 5.83$, $p = 0.017$, $\eta_p^2 = 0.05$。经过事后检验发现，均是高运动强度的工作记忆显著高于低运动强度(M = 3.29, SD = 0.16)，高认知参与的工作记忆显著高于低认知参与组(M = 3.31, SD = 0.15)。Time 和运动强度的交互作用显著，$F(2, 236) = 5.83$, $p = 0.044$, $\eta_p^2 = 0.03$，进一步进行简单效应分析，在第一次训练后和长期训练后，高运动强度的工作记忆(M = 3.34, SD = 0.19; M = 3.39, SD = 0.19)均高于低运动强度的工作记忆(M = 2.55, SD = 0.18; M = 3.36, SD = 0.18), $F(10, 109) = 11.39$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.51$ (见图 4)。Time 和认知参与的交互作用显著，$F(2, 236) = 5.83$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.09$，进一步进行简单效应分析，在长期训练后，高认知参与的工作记忆(M = 1094.30, SD = 0.18)要高于低认知参与(M = 2.98, SD = 0.18), $F(10, 109) = 18.65$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.63$ (见图 4)。并且，工作记忆的认知参与效果量($\eta_p^2 = 0.09$)要大于运动强度的效果量($\eta_p^2 = 0.03$)。

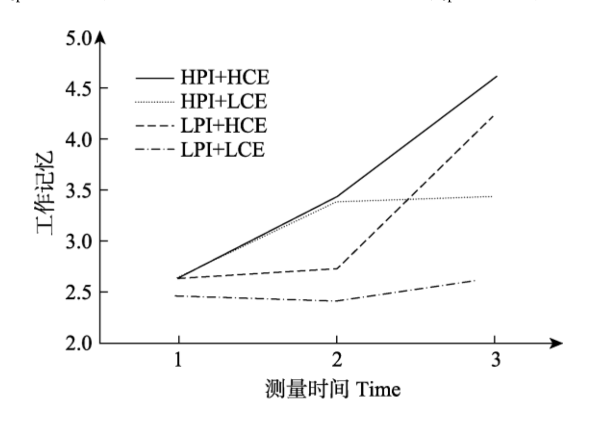


图 4 四组实验组的工作记忆趋势

注：H/L: High/Low，代表高/低；PI：physical intensity 的缩写，代表运动强度；CE：cognitive engagement，代表认知参与。下同。

3.2.2 运动强度和认知参与对儿童抑制控制的影响

(1)准确率

为考察运动强度和认知参与对儿童抑制控制准确率的影响，通过 2×2×3 的混合方差分析发现：准确率的测量时间 Time 主效应显著，$F(2, 236) = 37.44$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.24$。经过事后检验发现长期训练后测(M = 0.88, SD = 0.01)显著高于第一次训练后测(M = 0.81, SD = 0.02)，长期训练后测和第一次训练后测显著高于前测(M = 0.75, SD = 0.02)。准确率的运动强度的主效应显著，$F(1, 118) = 5.16$, $p = 0.025$, $\eta_p^2 = 0.04$，经过事后检验发现，高运动强度的准确率(M = 0.84, SD = 0.02)显著好于低运动强度的准确率(M = 0.78, SD = 0.02)。准确率的认知参与主效应不显著，$F(1, 118) = 1.257$, $p = 0.27$。Time 和运动强度交互作用不显著，$F(1, 118) = 1.14$, $p = 0.27$。Time 和认知参与交互作用不显著，$F(1, 118) = 0.22$, $p = 0.81$。

(2)反应时

为考察运动强度和认知参与对儿童抑制控制反应时的影响，通过 2×2×3 的混合方差分析发现：反应时的测量时间 Time 主效应显著，$F(2, 236) = 63.05$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.35$，经过事后检验发现长期训练后测(M = 0.78, SD = 0.02)显著高于第一次训练后测(M = 0.78, SD = 0.02)，长期训练后测和第一次训练后测显著快于前测(M = 0.78, SD = 0.02)。反应时的运动强度主效应不显著，$F(1, 118) = 0.51$, $p = 0.47$。反应时的认知参与的主效应不显著，$F(1, 118) = 0.49$, $p = 0.48$。Time 和运动强度交互作用不显著，$F(1, 118) = 3.21$, $p = 0.73$。Time 和认知参与交互作用不显著，$F(1, 118) = 0.63$, $p = 0.53$。

3.2.3 运动强度和认知参与对儿童认知灵活性的影响

(1)通过阶段数

为考察运动强度和认知参与对儿童认知灵活性通过阶段数的影响，通过 2×2×3 的混合方差分析发现：通过阶段数的测量时间 Time 主效应显著 $F(2, 236) = 21.67$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.16$，经过事后检验发现长期训练后测(M = 2.48, SD = 0.05)显著高于第一次训练后测(M = 2.01, SD = 0.08)，长期训练后测和第一次训练后测显著高于前测(M = 1.98, SD = 0.07)。通过阶段数的运动强度的主效应显著，$F(1, 118) = 4.02$, $p = 0.047$, $\eta_p^2 = 0.03$；认知参与主效应显著，$F(1, 118) = 5.50$, $p = 0.021$, $\eta_p^2 = 0.04$，分别经过事后检验发现，均是高运动强度的通过阶段数(M = 2.25, SD = 0.06)显著好于低运动强度(M = 2.07, SD = 0.06)，高认知参与的过阶段数(M = 2.26, SD = 0.06)显著好于低认知参与(M = 2.05, SD = 0.06) (见图 5)。其中，认知参与的效果量($\eta_p^2 = 0.04$)大于运动强度的效果量($\eta_p^2 = 0.03$)。Time 和认知参与的交互作用显著 $F(2, 236) = 3.16$, $p = 0.04$, $\eta_p^2 = 0.03$，进一步进行简单效应分析，在长期训练后，高认知参与的通过阶段数(M = 2.70, SD = 0.07)要显著高于低认知参与(M = 2.26, SD = 0.07), $F(10, 109) = 4.02$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.63$ (见图 5)。Time 和运动强度的交互作用不显著，$F(1, 118) = 0.50$, $p = 0.60$。

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08710v1

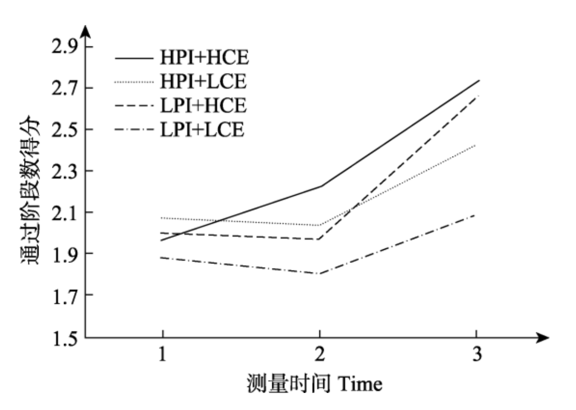


图 5　四组实验组认知灵活性——通过阶段数趋势

(2)正确分类次数

为考察运动强度和认知参与对儿童认知灵活性正确分类次数的影响，通过 2×2×3 的混合方差分析发现：正确分类次数的测量时间 Time 主效应显著，$F(2, 236) = 13.98$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.11$，经过事后检验发现长期训练的正确分类次数(M = 19.66, SD = 0.30)显著高于第一次训练后测(M = 16.64, SD = 0.62)，长期训练后测和第一次训练后测的正确分类次数显著高于前测(M = 16.55, SD = 0.60)。正确分类次数的认知参与主效应边缘显著，$F(1, 118) = 2.832$, $p = 0.095$, $\eta_p^2 = 0.02$，经过事后检验发现，高认知参与的正确分类次数(M = 18.22, SD = 0.50)显著高于低认知参与的正确分类次数(M = 17.00, SD = 0.51) (见图 6)。Time 和认知参与交互作用边缘显著 $F(2, 236) = 3.00$, $p = 0.052$, $\eta_p^2 = 0.03$，进一步进行简单效应分析，发现在长期训练后，高认知参与的正确分类次数(M = 21.14, SD = 0.42)要显著高于低认知参与的正确分类次数(M = 18.18, SD = 0.43) (见图 6)，$F(2, 236) = 13.98$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.11$。Time 和运动强度的交互作用不显著，$F(10, 109) = 18.65$, $p = 0.426$。

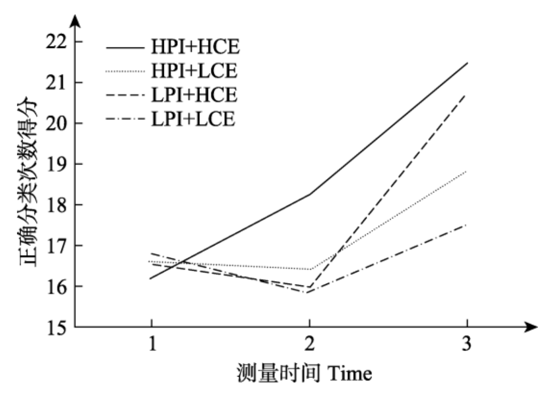


图 6　四组实验组认知灵活性——正确分类次数趋势

4　讨论

本研究通过在体感游戏中直接操控运动强度和认知参与，考察了二者对儿童执行功能的一次训练和长期训练效果。结果发现，一次性训练后，体感游戏中运动强度能改善儿童执行功能，尤其是工作记忆；长期训练后，运动强度和认知参与同时对儿童执行功能起促进作用，并且认知参与对执行功能的促进作用更大，尤其是对于工作记忆和认知灵活性。

4.1　在一次性体感游戏训练中运动强度具有显著作用

本研究首先验证了 Best (2012)的部分观点：在一次性训练后，体感游戏中的运动强度因素对工作记忆有明显的作用，基于唤醒理论，这可能是因为运动能够增加生理唤醒，从而允许更多地注意资源分配，能够有效地抗干扰(Hillman et al., 2009)。生理唤醒在一定程度上反映了大脑中神经递质(如多巴胺、去甲肾上腺素和血清素)释放的短暂变化(Meeusen et al., 2001)。这些变化会产生短暂的神经调节作用，促进执行功能。低运动强度的活动未能对儿童进行生理唤醒，无法促进儿童执行功能。

然而，在一次性训练中，体感游戏中的认知参与因素对儿童执行功未能起到促进效果，这可能是由于训练的时长及次数不足。以往通过采用改编的工作记忆、抑制控制等计算机化训练范式来改善 5 岁儿童的执行功能，训练周长达到 5 周，每周 4~5 次，这种计算机化训练对儿童有着很多认知挑战，属于高认知参与活动(Thorell et al., 2009)。因此，一次性训练中的认知参与强度可能不足以使儿童执行功能得到提升。

4.2　在长期训练中运动强度和认知参与共同起作用

本研究扩展了 Best (2012)的研究结果。在长期训练中，体感游戏的运动强度和认知参与两因素共同促进了儿童执行功能。这不仅肯定了 Schmidt 等人(2015)的发现“高运动强度+高认知参与”身体活动组的效果，而且更有力地说明了运动强度和认知参与共同促进了儿童的工作记忆、抑制控制和认知灵活性。与此同时，从维果斯基最近发展区的观点来看，游戏活动难度的设置能够调动儿童的积极性，发挥儿童的潜能，有利于帮助儿童实现更快的认知发展，因此，长期训练后，高认知参与的体感游戏能够促进儿童的执行功能。本研究所选用

ChinaXiv合作期刊

高认知参与的体感游戏需要儿童集中注意力，要在进行身体运动的同时进行思考和辨别任务，才能通关游戏。先前大量的认知训练研究已经表明长期的认知训练能够促进儿童执行功能(Baumeister et al., 2007)。

值得注意的是，长期训练过程中，通过比较各指标之间的效果量，发现认知参与对儿童执行功能的影响大于运动强度的影响，其中工作记忆、认知灵活性训练效果最明显。这是因为高认知参与的活动(Best, 2010; Tomporowski et al., 2008)有挑战性，需要复杂的认知参与，以便与同伴合作、预测同伴及对手的行为，运用各种策略以适应不断变化的任务需求。例如，Davis 等人(2011)利用孩子们的集体活动(如足球、篮球)促进儿童执行功能，这些集体活动被认为包含了许多认知需求。更重要的是，执行功能对儿童的执行过程有类似的要求，要求他们创造、调控和修改认知计划，以满足任务需求。因此，相较于运动强度，认知参与这一因素对改善儿童执行功能显得尤为重要。未来研究可以着力于研发多种运动强度与认知参与兼具的体感游戏，应用于体育课堂或者家庭游戏。

5 启示与不足

从应用层面来看，家长和教师在选择体感游戏时，不仅要挑选具有一定身体活动强度的体感游戏，还要注重体感游戏中的认知挑战程度，这两个因素都对于儿童的执行功能具有促进作用，从而促进儿童的认知发展。家长在陪伴儿童进行游戏时，体感游戏也是很好的选择。不仅能让儿童在游戏中进行运动，强身健体，还能让儿童在游戏中促进执行功能发展，有利于儿童的身心健康和学业成绩。

本研究有以下不足：一是由于儿童群体的特点，本研究未能将运动强度进行更细致区分。Kamijo 等人(2009)发现被试完成中等强度的急性有氧运动之后，抑制控制的提升幅度显著大于小强度运动的影响效果。中等强度的急性有氧运动亦能显著提高个体的专注力，而小强度和高强度的急性有氧运动则无法影响注意、认知灵活性等认知过程(Loprinzi & Kane, 2015)。因此，未来研究可继续探索儿童不同的运动强度是否会影响一次性训练的效果。二是本研究由于被试现实情况，不能进行延时后测，因此接下来的研究可以继续探讨体感游戏中运动强度和认知参与改善执行功能的延迟效果和迁移效果。三是本研究的效果量偏小，这可能是因为自变量认知参与较难操纵，本研究只能通过主观报告来了解儿童认知参与的程度，未来研究可以继续尝试如何更好的操纵和评估认知参与度，以获得更精准客观的结果。

6 结论

本研究得出以下两个结论：

(1)一次性训练时，体感游戏中的运动强度因子能够改善儿童的执行功能。

(2)长期训练时，体感游戏中的运动强度因子和认知参与因子都能改善儿童执行功能，并且认知参与因子对执行功能的促进效果大于运动强度因子。

参 考 文 献

Achtman, R. L., Green, C. S., & Bavelier, D. (2008). Video games as a tool to train visual skills. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *26*(4-5), 435−446.

Adcock, M., Fankhauser, M., Post, J., Lutz, K., Zizlsperger, L., Luft, A. R., ... de Bruin, E. D. (2020). Effects of an in-home multicomponent exergame training on physical functions, cognition, and brain volume of older adults: A randomized controlled trial. *Frontiers in Medicine*, *6*(7), 321−323.

Alesi, M., Bianco, A., Luppina, G., Palma, A., & Pepi, A. (2016). Improving children's coordinative skills and executive functions: The effects of a football exercise program. *Perceptual and Motor Skills*, *122*(1), 27−46.

Anderson-Hanley, C., Arciero, P. J., Barcelos, N., Nimon, J., Rocha, T., Thurin, M., & Maloney, M. (2014). Executive function and self-regulated exergaming adherence among older adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 989.

Audiffren, M., Tomporowski, P. D., & Zagrodnik, J. (2008). Acute aerobic exercise and information processing: Energizing motor processes during a choice reaction time task. *Acta Psychologica*, *129*(3), 410−419.

Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1994). Developments in the concept of working memory. *Neuropsychology*, *8*(4), 485−493.

Baler, R. D., & Volkow, N. D. (2007). Drug addiction: The neurobiology of disrupted self-control. *Trends in Molecular Medicine*, *12*(12), 559−566.

Baumeister, R. F., Vohs, K. D., & Tice, D. M. (2007). The strength model of self-control. *Current Directions in Psychological Science*, *16*(6), 351−355.

Benzing, V., Chang, Y.-K., & Schmidt, M. (2018). Acute physical activity enhances executive functions in children with ADHD. *Scientific Reports*, *8*(1), 543−545.

Benzing, V., Heinks, T., Eggenberger, N., & Schmidt, M. (2016). Acute cognitively engaging exergame-based physical activity enhances executive functions in adolescents. *PLoS ONE*, *11*(12), e0167501.

Benzing, V., & Schmidt, M. (2019). The effect of exergaming on executive functions in children with ADHD: A randomized clinical trial. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, *29*(8), 342−345.

Best, J. R. (2010). Effects of physical activity on children's executive function: Contributions of experimental research on aerobic exercise. *Developmental Review*, *30*(4), 331−351.

Best, J. R. (2012). Exergaming immediately enhances children's

chinaXiv:202303.08710v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.08710v1

executive function. *Developmental Psychology, 48*(5), 1501−1510.

Borella, E., Carretti, B., & Pelegrina, S. (2017). The specific role of inhibition in reading comprehension in good and poor comprehenders. *Journal of Learning Disabilities*, *43*(6), 541−552.

Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Pietraßyk-Kendziorra, S., Ribeiro, P., & Tidow, G. (2008). Acute coordinative exercise improves attentional performance in adolescents. *Neuroscience Letters*, *441*(2), 219−223.

Chen, A. G., Zhao, L., Li, H. Y., Yan, J., & Yin, H. C. (2014). Effects of acute basketball dribbling training of different intensity on executive function of primary students. *Journal of Tianjin Institute of Physical Education*, *29*(4), 352−355.

[陈爱国, 赵莉, 李焕玉, 颜军, 殷恒婵. (2014). 不同强度短时篮球运球训练对小学生执行功能的影响. *天津体育学院学报*, *29*(4), 352−355.]

Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, *44*(11), 2037−2078.

Davis, C. L., Tomporowski, P. D., Mcdowell, J. E., Austin, B. P., Miller, P. H., & Yanasak, N. E., … Naglieri, J. A. (2011). Exercise improves executive function and achievement and alters brain activation in overweight children: A randomized, controlled trial. *Health Psychology, 30*(1), 91−98.

Davis, J. C., Marra, C. A., Najafzadeh, M., & Liu-Ambrose, T. (2010). The independent contribution of executive functions to health related quality of life in older women. *BMC Geriatrics, 10*(1), 16−19.

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*(1), 135−168.

Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science, 333*(6054), 959−964.

Dye, M. W. G., & Bavelier, D. (2010). Differential development of visual attention skills in school-age children. *Vision Research*, *50*(4), 452−459.

Funahashi, S. (2001). Neuronal mechanisms of executive control by the prefrontal cortex. *Neuroscience Research, 39*(2), 147−165.

Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E., & Kramer, A. F. (2009). The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience, 159*(3), 1044–1054.

Kamijo, K., Nishihira, Y., & Higashiura, T. (2009). Effects of exercise intensity and physical activity levels on the brain and cognition. *Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine, 58*(1), 63−72.

Lakes, K. D. (2013). Measuring self-regulation in a physically active context: Psychometric analyses of scores derived from an observer-rated measure of self-regulation. *Mental Health and Physical Activity, 6*(3), 189−196.

Lauenroth, A., Ioannidis, A. E., & Teichmann, B. (2016). Influence of combined physical and cognitive training on cognition: A systematic review. *BMC Geriatrics, 16*(1), 1−14.

Lecce, S., Bianco, F., Devine, R. T., & Hughes, C. (2017). Relations between theory of mind and executive function in middle childhood: A short-term longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, *163*, 69−86.

Lin, J., Wang, K., Chen, Z. S., Fan, X., Shen, L. Q., Wang, Y. Z., ... Huang, T. (2018). Associations between objectively measured physical activity and executive functioning in young adults. *Percept Mot Skills*, *125*(2), 278−288.

Liu, X. C., Liao, M. Y., & Dou, D. H. (2019). Video game playing enhances young children's inhibitory control. *Lecture Notes in Computer Science, 7*(3), 141−153

Loprinzi, P. D., & Kane, C. J. (2015). Exercise and cognitive function: A randomized controlled trial examining acute exercise and free-living physical activity and sedentary effects. *Mayo Clinic Proceedings, 90*(4), 450−460.

Martinovic, D., Burgess, G. H., Pomerleau, C. M., & Marin, C. (2015). Comparison of children's gaming scores to NEPSY-II scores: Validation of computer games as cognitive tools. *Computers in Human Behavior*, *49*(2), 487−498.

Mcmorris, T., & Hale, B. J. (2012). Differential effects of differing intensities of acute exercise on speed and accuracy of cognition: A meta-analytical investigation. *Brain & Cognition*, *80*(3), 338−351.

Meeusen, D. R., Piacentini, M. F., & Meirleir, K. D. (2001). Brain microdialysis in exercise research. *Sports Medicine, 31*(14), 965−983.

Mehren, A., Özyurt, J., Lam, A. P., Brandes, M., Müller, H. H. O., Thiel, C. M., & Philipsen, A. (2019). Acute effects of aerobic exercise on executive function and attention in adult patients with ADHD. *Frontiers in Psychiatry*, *10*, 234−237.

Oei, A. C., & Patterson, M. D. (2014). Playing a puzzle video game with changing requirements improves executive functions. *Computers in Human Behavior*, *37*(5), 216−228.

Pesce, C. (2012). Shifting the focus from quantitative to qualitative exercise characteristics in exercise and cognition research. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *34*(6), 766−786.

Razza, R. A., Bergen-Cico, D., & Raymond, K. (2015). Enhancing preschoolers' self-regulation via mindful Yoga. *Journal of Child and Family Studies*, *24*(2), 372−385.

Riggs, N. R., Spruijt-Metz, D., Sakuma, K.-L., Chou, C.-P., & Pentz, M. A. (2010). Executive cognitive function and food intake in children. *Journal of Nutrition Education & Behavior*, *42*(6), 398−403.

Roche, J. D., & Johnson, B. D. (2014). Cogmed working memory training product review. *Journal of Attention Disorders*, *18*(4), 379−384.

Schmidt, M., Benzing, V., & Kamer, M. (2016). Classroom-based physical activity breaks and children's attention: Cognitive engagement works! *Frontiers in Psychology, 7*, 457−459.

Schmidt, M., Jäger, K., Egger, F., Roebers, C. M., & Conzelmann, A. (2015). Cognitively engaging chronic physical activity, but not aerobic exercise, affects executive functions in primary school children: A group-randomized controlled trial. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *37*(6), 575−591.

Staiano, A. E., Abraham, A. A., & Calvert, S. L. (2012). Competitive versus cooperative exergame play for African American adolescents' executive function skills: Short-term effects in a long-term training intervention. *Developmental Psychology, 48*(2), 337−342.

Thorell, L. B., Lindqvist, S., Bergman Nutley, S., Bohlin, G., & Klingberg, T. (2009). Training and transfer effects of executive functions in preschool children. *Development Science*, *12*(1), 106−113.

Tomporowski, P. D., Davis, C. L., Miller, P. H., & Naglieri, M. J. A.. (2008). Exercise and children's intelligence, cognition, and academic achievement. *Education Psychology Review,*

ChinaXiv合作期刊

20(2), 111−131.

Tomporowski, P. D., McCullick, B., Pendleton, D. M., & Pesce, C. (2015). Exercise and children's cognition: The role of exercise characteristics and a place for metacognition. *Journal of Sport & Health Science, 4*(1), 47−55.

Verburgh, L., Königs, M., Scherder, E. J. A., & Oosterlaan, J. (2014). Physical exercise and executive functions in preadolescent children, adolescents and young adults: A meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, *48*(12), 973−979

Weiss, M. D., Baer, S., Allan, B. A., Saran, K., & Schibuk, H. (2011). The screens culture: Impact on ADHD. *ADHD Attention Deficit & Hyperactivity Disorders*, *3*(4), 327−334.

Zelazo, P. D. (2006). The Dimensional Change Card Sort (DCCS): A method of assessing executive function in children. *Nature Protocols*, *1*(1), 297−301.

Exergame can improve children's executive function: The role of physical intensity and cognitive engagement

GAI XiaoSong, XU Jie, YAN Yan, WANG Yuan, XIE XiaoChun

(*College of Psychology, Northeast Normal University, Changchun* 130024, *China*)

Abstract

Executive function refers to advanced cognitive processes that control and regulate other cognitive processes, including working memory, inhibition control, and cognitive flexibility. This function is a high-level cognitive ability when completing complex cognitive tasks. Executive function is an important predictor of a child's physical and mental health, quality of life, school success, marital happiness, and public safety. Studies have shown that physical activities, such as mindfulness yoga, coordinated exercises, martial arts, and exergame, can improve children's executive function. Exergame is also a type of physical activity, as a synthetic word, which is a combination of exercise and game and can be seen as a physical activity for stimulating an active whole-body gaming experience. This study aims to investigate the effects of physical intensity and cognitive engagement in exergame on promoting children's executive function immediately and long-term training.

This study conducted a 2 (high/low physical intensity) × 2(high/low cognitive engagement) × 3(measurement time: before/immediately/after training) mixed experimental design, wherein 122 children age 4~6 years old were trained for six weeks. Among the within-subject variables were exercise physical and cognitive engagement, and the between-subject variable was the measurement time. The dependent variables were working memory, inhibitory control, and cognitive flexibility.

Results showed that physical intensity, rather than cognitive engagement in exergame, significantly improved children's executive function, especially the working memory after training immediately. In the long-term intervention, physical intensity and cognitive engagement in exergame significantly promoted children's executive function, and the promoting effect of cognitive engagement was greater than that of physical intensity.

This study demonstrates the benefits of long-term exergame training on children's executive function and the types of exergame that can improve such function in children in the short or long term.

Key words exergame, cognitive engagement, physical intensity, executive function

chinaXiv:202303.08710v1